



**Eur päisches
Patentamt**

**European
Patent Office**

**Office européen
des brevets**

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-
gen stimmen mit der
ursprünglich eingereichten
Fassung der auf dem näch-
sten Blatt bezeichneten
europäischen Patentanmel-
dung überein.

The attached documents
are exact copies of the
European patent application
described on the following
page, as originally filed.

Les documents fixés à
cette attestation sont
conformes à la version
initialement déposée de
la demande de brevet
européen spécifiée à la
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

02102786.7

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

R C van Dijk

THIS PAGE BLANK (USPTO)



Anmeldung Nr:
Application no.: 02102786.7
Demande no:

Anmeldetag:
Date of filing: 18.12.02
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Sulzer Markets and Technology AG
Zürcherstrasse 12,
Postfach 414
8401 Winterthur
SUISSE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.
If no title is shown please refer to the description.
Si aucun titre n'est indiqué se referer à la description.)

Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)
revendiquée(s)
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/
Classification internationale des brevets:

G07C/

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL
PT SE SI SK TR

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Sulzer Markets and Technology AG, CH-8401 Winterthur (Schweiz)

5

Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegt. Die Erfindung betrifft ferner die Verwendung eines solchen Verfahrens für die Wartungsplanung.

Für viele Vorrichtungen, wie beispielsweise Turbinen oder Strahltriebwerke von Flugzeugen, ist der Verschleiss von oder an wesentlichen Bauteilen der Hauptgrund für die begrenzte Lebensdauer, wobei mit "Lebensdauer" üblicherweise die Zeitspanne bzw. die Betriebsdauer zwischen zwei ordentlichen Revisionen gemeint ist. Verschleiss kann sich durch Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen manifestieren, was beispielsweise auf Reibung, Hitze oder Ermüdung zurückzuführen ist. Diese Veränderungen an den Bauteilen bewirken auch bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen ein geändertes Verhalten der gesamten Vorrichtung. Es ist daher notwendig, in regelmässigen Abständen Revisionen oder Wartungsarbeiten an der Vorrichtung vorzunehmen.

Heute bekannte Verfahren zur Planung solcher Wartungsarbeiten basieren üblicherweise auf rein zeitbestimmten Wartungsintervallen, das heisst es wird ein fixes Zeitintervall für die Lebensdauer zwischen zwei Revisionen angesetzt. Aus Sicherheitsgründen werden sehr konservative Näherungen für die bereits verbrauchte Lebenszeit angenommen. Es ist klar, dass solche rein zeitgestützten Verfahren nicht zu einer optimalen Ausnutzung der Möglichkeiten der Vorrichtung führen, weil der tatsächlich aufgetretene Verschleiss, der auch durch die konkreten Betriebs- und

Umgebungsbedingungen beeinflusst wird, nicht berücksichtigt wird. Um die Effizienz der Nutzung von solchen Vorrichtungen, beispielsweise Flugzeugtriebwerken, zu steigern, ist es daher wünschenswert, eine realistischere Schätzung für die Restlebensdauer zur Verfügung zu haben, bei welcher auch die tatsächlichen Betriebs- und Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden, um so eine effizientere und wirtschaftlichere Wartungsplanung zu ermöglichen.

Dieser Aufgabe widmet sich die vorliegende Erfindung. Es soll also ein Verfahren für die Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung vorgeschlagen werden, bei welchem die konkreten Betriebsbedingungen und somit die effektiv bzw. real verbrauchte Lebensdauer der Vorrichtung berücksichtigt wird.

Das diese Aufgabe lösende Verfahren ist durch die Merkmale des unabhängigen Verfahrensanspruchs gekennzeichnet.

- Erfindungsgemäss wird also ein Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung vorgeschlagen, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegt, mit den folgenden Schritten:
- a) für mindestens einen charakteristischen Parameter, der sensitiv für den Verschleiss ist, wird ein Zusammenhang mit einer Zeitgrösse ermittelt, welche repräsentativ für die Betriebsdauer ist;
 - b) für den charakteristischen Parameter wird ein Grenzwert festgelegt, der den maximal zulässigen Verschleiss angibt;
 - c) es wird ein Kennfeld erstellt, das einen Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter, der Zeitgrösse und dem Verschleiss angibt;
 - d) mit Hilfe messtechnisch erfasster Daten werden Ist-Werte für den charakteristischen Parameter in Abhängigkeit von der Zeitgrösse ermittelt;
 - e) aus den Ist-Werten wird jeweils anhand des Kennfelds der momentan vorhandene Verschleiss ermittelt;
 - f) ausgehend von dem momentanen Ist-Wert des charakteristischen Parameters wird mittels Extrapolation auf den Grenzwert bestimmt, für welchen Endwert der Zeitgrösse der maximal zulässige Verschleiss erreicht wird;
 - g) durch Vergleich dieses Endwerts mit dem Wert für die Zeitgrösse, der zu

dem momentan vorhandenen Verschleiss gehört, wird die Restlebensdauer geschätzt.

Bei dem erfindungsgemässen Verfahren wird der Verschleiss anhand mindestens eines charakteristischen Parameters quantifiziert, der sensitiv
5 bezüglich des Verschleisses ist. Für die Vorrichtung wird ein Kennfeld erstellt, welches den Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter, der Zeitgrösse und dem Verschleiss beschreibt. Im Falle nur eines charakteristischen Parameters lässt sich dieses Kennfeld als eine Fläche in einem dreidimensionalen Raum darstellen, welcher Raum durch
10 den charakteristischen Parameter, die Zeitgrösse und den Verschleiss aufgespannt wird.

An der Vorrichtung werden messtechnisch Daten erfasst, aus denen ein Ist-Wert für den Parameter in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt werden kann. Anhand des Kennfelds kann dann ermittelt werden, wie weit der Verschleiss
15 quantitativ, beispielsweise in Prozent, fortgeschritten ist. Durch eine Extrapolation auf den maximal zulässigen Grenzwert für den charakteristischen Parameter kann dann die Restlebensdauer geschätzt werden.

Das erfindungsgemässe Verfahren berücksichtigt somit die tatsächlich und
20 effektiv bereits verbrauchte Lebenszeit, um davon ausgehend die Restlebensdauer abzuschätzen. Es wird also nicht nur die Zeitgrösse berücksichtigt, sondern zusätzlich werden die Betriebs- und gegebenenfalls die Umgebungsbedingungen berücksichtigt, unter denen die Vorrichtung bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt betrieben wurde. Diese betriebsabhängige
25 Schätzung der Restlebensdauer, welche die Historie der Vorrichtung berücksichtigt, ermöglicht eine wesentlich effizientere Ausnutzung der Vorrichtung, weil Wartungen erst dann durchgeführt werden brauchen, wenn sie tatsächlich notwendig sind. Die zuverlässige Vorhersage der Verschleissentwicklung ermöglicht somit eine zustandsbasierte
30 Wartungsplanung.

Vorzugsweise wird die Restlebensdauer für unterschiedliche Stadien im Lebenszyklus ermittelt, das heisst mit fortschreitendem Verbrauch der

Lebenszeit -gemessen durch die Zeitgrösse- wird die Restlebensdauer mehrmals neu geschätzt.

In einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel wird das Kennfeld mit Hilfe von a-priori-Wissen über das Verschleissverhalten erstellt. Da
5 Vorrichtungen, wie beispielsweise Flugzeugtriebwerke (Strahltriebwerke) sehr komplexe Systeme darstellen, ist es in der Regel -wenn überhaupt- nur mit grösserem Aufwand möglich eine genügend genaue physikalische oder deterministische Modellierung der Vorrichtung durchzuführen. Daher wird es bevorzugt, a-priori-Know-how für die Erstellung des Kennfeldes
10 heranzuziehen. Die Erfahrungen, Beobachtungen oder auch Messungen, die man an gleichen oder ähnlichen Vorrichtungen gesammelt hat, werden verwendet, um das qualitative und/oder quantitative Verhalten des charakteristischen Parameters mit fortschreitendem Verschleiss zu beschreiben. Durch die Verwendung von solchem a-priori-Wissen vereinfacht
15 sich die Erstellung des Kennfelds erheblich. Ferner führt die Verwendung des a-priori-Wissens normalerweise dazu, dass das Kennfeld die Vorrichtung besser oder exakter beschreibt.

Vorzugsweise umfasst das a-priori-Wissen den qualitativen und/oder quantitativen Verlauf von Verschleisskurven, welche den Zusammenhang
20 zwischen dem charakteristischen Parameter und der Zeitgrösse angeben.

Da das a-priori-Know-how meist in verbaler Form vorliegende Spezifikationen umfasst, wird das Kennfeld besonders bevorzugt mittels einem linguistischen Fuzzy Modell erstellt. Dadurch kann beispielsweise zuerst ein rein
qualitatives Modell zur Bestimmung des Verschleisses generiert werden,
25 dass dann auf der Basis von gemessenen Lebenszyklen bezüglich seiner quantitativen Eigenschaften ausreichend optimiert wird.

Auch hat es sich in der Praxis als vorteilhaft erwiesen wenn das Kennfeld anhand von Messdaten oder basierend auf Plausibilitätsbetrachtungen modifiziert wird. Solche Plausibilitätsbetrachtungen haben sich
30 beispielsweise als sehr nützlich erwiesen, um gewisse Randbereiche des Kennfeldes zu modellieren, die Zuständen entsprechen, welche die reale Vorrichtung selten erreicht.

Ferner ist es bevorzugt, wenn die messtechnisch erfassten Daten zur Ermittlung der Ist-Werte für den charakteristischen Parameter jeweils einer Filterung oder einer Mittelung unterzogen werden. Häufig sind die messtechnisch erfassten Daten von einem Rauschen oder einer sonstigen Störgrösse überlagert, sodass ihre direkte Verwendung, insbesondere bei Fuzzy Modellen, keine robuste Aussage bezüglich des Verschleissgrades erlaubt.

Zur Bestimmung der Ist-Werte wird vorzugsweise mit Hilfe mehrerer Sätze von messtechnisch erfassten Daten ein Modell erstellt, mit dem ein Ist-Wert für den charakteristischen Parameter ermittelt wird.

Das erfindungsgemässe Verfahren eignet sich insbesondere für die Schätzung der Restlebensdauer von einem Triebwerk, insbesondere von einem Flugzeugtriebwerk.

Das erfindungsgemässe Verfahren ist besonders gut geeignet für die Wartungsplanung, insbesondere eines Flugzeugs oder einer Vielzahl von Flugzeugen (Flottenmanagement).

Weitere vorteilhafte Massnahmen und bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels und anhand der Zeichnung näher erläutert. In der schematischen Zeichnung zeigen:

Fig. 1: typische Verschleisskurven für ein Flugzeugtriebwerk,

Fig.2: Zugehörigkeitsfunktion (membership function) eines Fuzzy Sets,

Fig. 3: ein Kennfeld in einem dreidimensionalen Raum, der durch die A-Achse, die T-Achse und die V-Achse aufgespannt wird,

Fig. 4: Eine Projektion von historischen Daten in die Ebene, die von der A-Achse und der V-Achse aufgespannt wird,

Fig. 5: eine Darstellung der A-T-Ebene zur Illustration einer Extrapolation in einem Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemässen Verfahrens,

5 Fig. 6: wie Fig. 4, jedoch zusätzlich mit der Projektion einer Extrapolation; und

Fig. 7: mehrere Darstellungen jeweils wie in Fig. 6, jedoch zu unterschiedlichen Zeiten des Lebenszyklus, zur Verdeutlichung der jeweiligen Schätzung der Restlebensdauer nach dem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens.

10 Das erfindungsgemässe Verfahren wird im Folgenden mit beispielhaftem Charakter unter Bezugnahme auf ein Strahltriebwerk eines Flugzeugs erläutert. Dabei steht das Triebwerk als repräsentatives Beispiel für eine Vorrichtung, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegt und für die eine Schätzung der Restlebensdauer erfolgen soll. Selbstverständlich ist
15 die Erfindung nicht auf diese Anwendung beschränkt, sondern eignet sich in sinngemäss gleicher Weise auch für andere Vorrichtungen wie beispielsweise landgestützte Turbinen, Strömungsmaschinen oder sonstige mechanische Systeme, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegen und daher gewartet werden müssen.

20 Mit dem Begriff "Lebensdauer" ist der Abschnitt zwischen zwei ordentlichen Revisionen bzw. Wartungen gemeint, das heisst unmittelbar nach der Wartung wird der Verschleissgrad mit "neu" beurteilt.

Als charakteristischer Parameter der sensitiv bezüglich des Verschleisses des Flugzeugtriebwerkes ist, wird die Änderung der Gasaustrittstemperatur
25 des Triebwerks gewählt. Diese Temperaturänderung wird im Folgenden mit T bezeichnet.

Als Zeitgrösse, welche repräsentativ für die Betriebsdauer bzw. die Lebensdauer ist, wird die Anzahl der Flüge gewählt, die im Folgenden mit A bezeichnet wird. Natürlich würden sich auch andere Zeitgrössen,
30 beispielsweise die Anzahl der Betriebsstunden, eignen.

Der Verschleiss V wird durch eine Zahl aus dem Intervall von null bis eins beschrieben, wobei $V=0$ 'neu' bedeutet, es ist noch kein Verschleiss aufgetreten und $V=1$ 'verbraucht', das heisst die zulässige Verschleissgrenze ist erreicht. Ein Verschleiss von $V=0.6$ bedeutet also beispielsweise, dass der Verschleissgrad 60% des maximal zulässigen Verschleisses beträgt.

Als Grenzwert G für die Temperaturänderung T , der das Erreichen des maximal zulässigen Verschleisses angibt, wird eine Temperaturerhöhung von 40 K gewählt. Dieser Wert beruht auf Erfahrungen, die als a-priori-Know-how eingebracht werden.

Fig. 1 zeigt mehrere typische Verschleisskurven K1-K4, die jeweils einen möglichen Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung T als charakteristischen Parameter und der Anzahl A der Flüge als Zeitgrösse angeben. Derartige Verschleisskurven stellen a-priori-Wissen dar, welches im vorliegenden Ausführungsbeispiel zur Erstellung des Kennfelds herangezogen wird. Die Verschleisskurven basieren auf Erfahrungen bzw. messtechnisch erfassten Daten, die man an gleichen oder ähnlichen Triebwerken gemacht hat.

Ferner ist in Fig. 1 der Grenzwert $G=40K$ für die Temperaturerhöhung eingezeichnet sowie ein Intervall L , das einen typischen Lebenszyklus für ein solches Triebwerk angibt.

Es ist zu erkennen, dass die Kurven K1-K4 zwar alle unterschiedlich aussehen, jedoch qualitativ das gleiche Verhalten zeigen. Am Anfang des Lebenszyklus, der bei $A=0$ und $T=0$ beginnt, ist zunächst ein stärker Anstieg der Verschleisskurven zu erkennen, es folgt ein Plateau, auf welchem sich die Temperaturerhöhung kaum ändert und gegen Ende des Lebenszyklus ist wieder ein stärkerer Anstieg der Temperaturerhöhung zu beobachten. Alle Verschleisskurven enden bei $T=40K$, also beim Erreichen des Grenzwerts G .

Eine Möglichkeit, den Verschleiss zu quantifizieren, besteht darin, dass man das Wegintegral über die gesamte Verschleisskurve auf eins normiert. Dann definiert die W -gläng für jed'n Punkt auf der Verschleisskurve gerade den entsprechenden Verschleiss. Hat man beispielsweise A1 Flüge zurückgelegt,

so ergibt sich der quantifizierte Verschleiss aus dem Wegintegral über die Verschleisskurve von 0 bis A1.

Das Problem ist jedoch, dass für ein gegebenes Triebwerk, die messtechnisch erfasste Verschleisskurve erst am Ende seiner Lebenszeit
5 bekannt ist. Anders ausgedrückt: Für ein neues, d.h. frisch gewartetes Triebwerk ist nicht bekannt, entlang welcher der beliebig vielen Verschleisskurven es sich während seines Lebenszyklus bewegen wird.

Etwas vereinfacht ausgedrückt wird bei dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens im Verlauf des
10 fortschreitenden Verbrauchs der Lebensdauer die Schätzung der Restlebensdauer dadurch verbessert, dass die Vorhersage ständig (das heisst beispielsweise nach jedem Flug) auf die richtige Verschleisskurve angepasst wird.

Aus Sicht eines Input/Output Modells sind damit der charakteristische
15 Parameter und die Zeitgrösse, welche die bisher verbrauchte Lebensdauer misst, als Inputs und der Verschleiss als Output als notwendige und hinreichende Informationen für die Schätzung der Restlebensdauer zu verwenden.

Bei dem erfindungsgemässen Verfahren wird zunächst ein Kennfeld KF
20 (siehe Fig. 3) erstellt, das einen Zusammenhang zwischen den charakteristischen Parameter (hier die Temperaturerhöhung T), der Zeitgrösse (hier die Anzahl A der Flüge) und dem Verschleiss V angibt.

Vorzugsweise wird dieses Kennfeld mit Hilfe von a-priori-Know-how erstellt, also beispielsweise unter Verwendung von Verschleisskurven K1-K4, wie sie
25 in Fig. 1 dargestellt sind.

Für die Umsetzung dieses a-priori-Wissens wird besonders bevorzugt ein linguistisches Fuzzy Modell (MAMDANI-Modell) verwendet. Da solche Fuzzy Modelle bzw. die Fuzzy Logik an sich dem Fachman hinreichend bekannt sind, wird hier nur kurz erläutert, wie bei dem Ausführungsbeispiel der

erfindungsgemässen Verfahrens das Kennfeld KF mit Hilfe eines linguistischen Fuzzy Modells erstellt wird.

- Für das linguistische Fuzzy Modell stehen bei dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel folgende Informationen als a-priori-Know-how zur Verfügung: Kenntnis über den qualitativen und quantitativen Verlauf von Verschleisskurven (siehe Fig. 1); zusätzliche Anforderungen an die Vorhersage in Randgebieten.

- Als Inputgrössen dienen die Temperaturerhöhung T und die bisher verbrauchte Lebensdauer, gemessen durch die Anzahl A der Flüge, als Outputgrösse der Verschleiss V. Jede der Input- und der Outputgrössen wird durch ein Fuzzy Set charakterisiert. Als Beispiel zeigt Fig. 2 die Zugehörigkeitsfunktion (membership function) des Fuzzy Set für die Inputgrösse Temperaturerhöhung T. Für die linguistische Variable T sind die linguistischen Werte "klein", "mittel" und "gross" vorgesehen.
- Für die Inputgrösse A "Anzahl Flüge" sind die linguistischen Werte "wenig", "viel", "limit" vorgesehen und für die Outputgrösse "Verschleiss" V die linguistischen Werte "neu", "neuwertig", "gebraucht", "verbraucht".

Anschliessend wird unter Verwendung der Fuzzy Sets das Regelwerk definiert, das im konkreten Fall die folgenden vier Regeln umfasst

- IF (T is klein) AND (A is wenig) then (V is neu)
IF (T is klein) AND (A is viel) then (V is neuwertig)
IF (T is mittel) AND (A is viel) then (V is gebraucht)
IF (T is gross) AND (A is limit) then (V is verbraucht)

- Aus diesen Informationen lässt sich dann ein Kennfeld KF erstellen wie es in Fig. 3 als Netz (Mesh) dargestellt ist. Natürlich ist es möglich und normalerweise auch üblich, dass zunächst ein erster "Entwurf" für das Kennfeld KF erstellt wird und dieses dann verfeinert wird. Derartige Verfeinerungen können zum Beispiel erfolgen durch Versuchs- und Irrtumsstrategien (trial and error), Berücksichtigung von Messdaten, händisch s Nachmodellieren aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen (z. B.

dass der Rand der Kennfelds auf der Linie mit $T=40K$ und $V=1$ liegt) oder sonstige Optimierungs- oder Kalibrierungsverfahren. Das sich daraus ergebende Kennfeld KF für das hier beschriebene Ausführungsbeispiel ist in Fig. 3 dargestellt.

- 5 Mithilfe dieses Kennfelds KF, welches den Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung T , Anzahl der Flüge A und Verschleiss V beschreibt, wird nun während des Lebenszyklus des Triebwerks die Schätzung der Restlebensdauer vorgenommen, was im Folgenden erläutert wird.

- 10 Während des Lebenszyklus des Triebwerks werden messtechnisch Daten des Triebwerks erfasst - beispielsweise bei oder nach jedem Flug -, aus denen dann Ist-Werte für den charakteristischen Parameter (hier die Temperaturerhöhung T) in Abhängigkeit von der Zeitgrösse (hier die Anzahl A der Flüge) ermittelt werden. Natürlich ist es je nach konkretem Anwendungsfall auch möglich und gegebenenfalls auch vorteilhaft, als Ist-
- 15 Werte jeweils die direkt messtechnisch erfassten Daten zu verwenden, im vorliegenden Ausführungsbeispiel hat es sich jedoch als vorteilhaft erwiesen, die messtechnisch erfassten Daten einer Filterung bzw. einer Mittelung zu unterziehen. Der Grund hierfür ist, dass die Änderung der
- 20 Gasaustrittstemperatur T aufgrund des hohen Absolutwerts der Gasaustrittstemperatur von einem starken Rauschen überlagert ist. Eine typische Rauschamplitude kann die Hälfte oder sogar noch mehr der messtechnisch erfassten Datensignale betragen.

- Prinzipiell eignen sich natürlich sehr viele an sich bekannte Verfahren und Methoden, um die messtechnisch erfassten Daten einer Mittelung oder einer
- 25 Filterung zu unterziehen. Mit beispielhaften Charakter wird eine Möglichkeit erläutert, die eine Methode verwendet, welche in der EP-A-0 895 197 (P.6822) offenbart ist.

- Die Änderung der Gasaustrittstemperatur T wird in regelmässigen Abständen, also beispielsweise bei jedem Flug messtechnisch erfasst. Dies
- 30 führt zu einem Datensatz der Form $[T_i ; A_i]$ mit $i = 1, \dots, n$, wobei T_i die Temperaturänderung für den Flug mit der Nummer A_i bezeichnet. Nun wird jeweils ein Teil dieses Datensatzes, beispielsweise die Daten mit $i=1,2,\dots, 20$;

die Daten mit $i=21,22,\dots,40$; usw. dazu verwendet, um ein Modell zu erstellen. Dies führt zu einer Mehrzahl von Modellen. Jedes dieser Modelle wird dann für den gleichen Zustand, den sogenannten Nominalzustand, ausgewertet, um so die Ist-Werte für den charakteristischen Parameter zu ermitteln.

- 5 Bezüglich weiterer Details wird auf die EP-A-0 895 197 verwiesen.

Durch diese Massnahme erfolgt eine Mittelung der messtechnisch erfassten Daten, welche die Rauschamplitude erheblich reduziert. Auf diese Weise lassen sich Ist-Werte für die Temperaturerhöhung T in Abhängigkeit von der Anzahl A der Flüge ermitteln.

- 10 Für das Triebwerk stehen zu der Zeit, zu der die Schätzung der Restlebensdauer erfolgen soll, die historischen Messdaten bzw. die Ist-Werte für die Temperaturerhöhung T bis zur Gegenwart zur Verfügung. Jedem Wertepaar (T_k, A_k) aus einem Ist-Wert für die Temperaturerhöhung und der zugehörigen Lebensdauer, gemessen durch die Anzahl der Flüge A_k
15 entspricht ein Punkt in der von der A -Achse und der T -Achse aufgespannten Ebene (siehe Fig. 3). Aus Gründen der besseren Übersicht ist in Fig. 3 nur ein solcher Punkt mit den Koordinaten (T_k, A_k) in der T - A -Ebene als Kreuz eingezeichnet. Dieser Punkt wird nun auf das Kennfeld KF projiziert, also darstellungsgemäss nach oben auf das durch das Netz dargestellte Kennfeld
20 KF . Dann lässt sich direkt der zu (T_k, A_k) gehörende Verschleiss V_k ablesen.

- Wie bereits erwähnt, sind bis zur Gegenwart alle Wertepaare (T_k, A_k) bekannt. Bildet man jedes Wertepaar auf das Kennfeld KF ab und projiziert das Ergebnis auf diejenige Ebene, die von der A -Achse (Anzahl Flüge) und der V -Achse (Verschleiss) aufgespannt wird, so ergibt sich beispielsweise die in
25 Fig. 4 dargestellte Kurve. Sie beschreibt für alle historischen Daten den quantifizierten Verschleiss V in Abhängigkeit von der bereits verbrauchten Lebenszeit, gemessen durch die Anzahl A der Flüge. Im konkreten Beispiel sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt etwa 1300 Flüge absolviert und der Verschleiss liegt bei etwa 55%.

- 30 Für die Vorhersage des künftigen Verlaufs des Verschleisses V und damit für die Schätzung der Restlebensdauer erfolgt nun eine Extrapolation auf den Grenzwert G für die Temperaturerhöhung T . Selbstverständlich gibt es

5 zahlreiche Möglichkeiten einer Extrapolation. Die Wahl einer geeigneten Extrapolation hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Es muss insbesondere berücksichtigt werden, wie konservativ die Schätzung sein darf oder soll, das heisst wie hohe Anforderungen an die Sicherheit der Prognose gestellt werden müssen. Dementsprechend können bei der Extrapolation mehr oder weniger pessimistische Entwicklungen in Betracht gezogen und durch die Extrapolation errechnet werden.

10 Bei sehr sensiblen Anwendungen, wie beispielsweise im vorliegenden Fall eines Flugzeugtriebwerks, wird man mit pessimistischeren Prognosen arbeiten, um genügend Sicherheitsreserven zu haben und ein Erreichen der Verschleissgrenze vor dem Ablauf der geschätzten Restlebensdauer auszuschliessen.

15 Im hier beschriebenen Ausführungsbeispiel lässt sich eine pessimistische Entwicklung der Temperaturerhöhung über die Anzahl der Flüge ableiten, die im Normalfall mindestens benötigt werden um den Grenzwert $G=40K$ für die Temperaturerhöhung T zu erreichen. Man kann beispielsweise anhand solcher Verschleisskurven $K1-K4$, wie sie in Fig. 1 dargestellt sind, abschätzen, welches die minimale Anzahl A der Flüge bis zum Erreichen des Grenzwerts ist. In Fig. 1 ist diese minimale Anzahl durch den Punkt gegeben, wo die Verschleisskurve $K1$ den Grenzwert erreicht.

Aus den Daten, die dem Kennfeld KF in Fig. 3 zugrunde liegen, ergibt sich die minimale Anzahl von Flügen zu 2000 Flügen.

25 Bezüglich der Extrapolation wird nun wie folgt vorgegangen. Fig. 5 zeigt die Ebene die von der A -Achse und der T -Achse aufgespannt ist. Wie bereits in Fig. 3 ist nur ein Punkt (A_k, T_k) eingezeichnet. Dies sei der aktuellste Punkt, also derjenige, welcher der Gegenwart entspricht, in der die Schätzung vorgenommen wird. Von diesem Punkt wird nun, wie dies die strichpunktierte Linie E zeigt, linear auf den Grenzwert $G=40K$ für die Temperaturerhöhung T extrapoliert. Der Gradient mit dem die Linie E an den Punkt (T_k, A_k) "angehängt" wird, ist wie folgt bestimmt worden. Davon ausgehend, dass die
30 minimale Anzahl von Flügen zum Erreichen des Grenzwerts G der Temperaturerhöhung T wie oben erwähnt $A=2000$ Flüge beträgt, bestimmt

man die zugehörige Steigung, die sich ergibt, wenn man die Punkte $T=0$, $A=0$ (Neuzustand) und $T=40K$, $A=2000$ Flüge durch eine Gerade miteinander verbindet. Der daraus resultierende Gradient wird dann aus sicherheitsgründen noch reduziert, im vorliegenden Beispiel wurde er
5 halbiert, das heisst, es wurde angenommen, dass der Grenzwert bereits nach der halben Anzahl Flüge erreicht wird. Die daraus resultierende Extrapolation ist die in Fig. 5 dargestellte Linie E.

Im nächsten Schritt wird die Linie E in das Kennfeld KF abgebildet, wodurch sie im allgemeinen zu einer gekrümmten Linie wird. Projiziert man nun das
10 Kennfeld KF wieder -analog zu der Darstellung in Fig. 4- auf die von der V-Achse und der A-Achse aufgespannte Ebene, so resultiert die in Fig. 6 gezeigte Darstellung. Neben den historischen Werten (die natürlich identisch mit denen in Fig. 4 sind) ist nun auch die Projektion E' der Extrapolation zu sehen, die strichliert dargestellt ist. Die Projektion E' der Extrapolation
15 erreicht die Verschleissgrenze $V=1$ nach einer Anzahl Flügen, die als Endwert mit AG bezeichnet ist. Die Schätzung der Restlebensdauer ergibt sich nun durch Differenzbildung aus dem Endwert AG und dem gegenwärtigen Wert für die Anzahl der Flüge, also dem jüngsten der historischen Werte. In Fig. 6 ist dies der letzte Punkt der durchgezogenen
20 Kurve.

Dieses Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer wird nun während der Lebensdauer des Triebwerks ständig oder in vorgebbaren Abständen wiederholt. Dabei ist der Voraussagehorizont im wesentlichen durch die Wahl des Gradienten bestimmt. Die Wahl eines vernünftigen Gradienten hat
25 anwendungsspezifisch zu erfolgen.

Zum besseren Verständnis illustriert Fig. 7 die Schätzung der Restlebensdauer für sieben Stadien im Lebenszyklus eines Triebwerks. In jeder der Abbildungen in Fig. 7 ist jeweils in gleicher Weise wie in Fig. 4 und Fig. 6 die von der V-Achse und der A-Achse aufgespannte Ebene dargestellt,
30 die sich durch Projektion des Kennfelds ergibt. Die historischen Daten, das heisst diejenigen Daten, die auf messtechnisch erfassten Daten basieren, sind jeweils als durchgezogene Linien dargestellt, die Extrapolationen, die der Schätzung zugrund liegen, sind strichliert dargestellt. Der Übergang von

der durchgezogenen zur strichlierten Linie gibt also die jeweilige Gegenwart an, in der die Schätzung erfolgte. Rechts neben den Darstellungen ist jeweils die geschätzte Restlebensdauer RL in Anzahl Flügen anzusehen. In der obersten Darstellung, in der noch keine historischen Daten vorliegen, ist die Restlebensdauer im wesentlichen durch den gewählten Gradienten bestimmt.

In der von oben gesehen zweiten bis fünften Abbildung wird stets eine Restlebensdauer von etwa 500 Flügen prognostiziert. Das heisst, der Flugzeugbetreiber bekommt beispielsweise nach 650 Flügen (dritte Abbildung) die Information, dass noch mindestens 500 Flüge bis zur nächsten Wartung möglich sind. Nach etwa 1000 Flügen (vierte Darstellung) bekommt der Betreiber die Information, dass immer noch mindestens 480 Flüge durchführbar sind. Nach etwas mehr als 1300 Flügen (fünfte Darstellung) erhält der Betreiber wieder die Information, dass noch mindestens 480 Flüge durchführbar sind. Auch diese Prognosen in der zweiten bis fünften Darstellung sind im wesentlichen noch durch den Voraussagehorizont und somit durch die Wahl des Gradienten bestimmt.

Erst in der sechsten Darstellung (sechste Schätzung) zeichnet sich das Ende des Lebenszyklus ab, sodass der Betreiber nun die Revisionsplanung ansetzen kann. Aufgrund des gewählten Gradienten für die Extrapolation lässt sich das sich abzeichnende Ende des Lebenszyklus etwa 500 Flüge vor Erreichen der Verschleissgrenze erkennen. Bezieht man dies auf den gesamten Lebenszyklus von etwa 2000 Flügen, so bleibt dem Betreiber für die Wartungsplanung ein erheblicher Handlungsspielraum von etwa 25% des Lebenszyklus.

Zwar liesse sich der Voraussagehorizont durch Wahl eines kleineren Gradienten für die Extrapolation erweitern bzw. verlängern. Dies würde jedoch in der Praxis nicht zu einem deutlich grösseren Nutzen führen, aber das Risiko einer zu optimistischen Schätzung der Restlebensdauer erhöhen.

Durch die hier beschriebene Schätzung der Restlebensdauer des Flugzeugtriebwerks, die quantifizierten Verschleiss berücksichtigt, wird es möglich das Potential der Triebwerke wesentlich effizienter zu nutzen, ohne dass dafür Zugeständnisse an die Betriebssicherheit vonnöten sind. Die

gesamte Wartungs- oder Revisionsplanung lässt sich optimieren, wodurch ein wirtschaftlich deutlich günstigerer Betrieb ermöglicht wird. Somit lässt sich das erfindungsgemässe Verfahren insbesondere für die Wartungsplanung an Flugzeugtriebwerken vorteilhaft einsetzen. Dies ermöglicht auch eine deutlich effizientere Planung der Wartungsarbeiten an einer Vielzahl von Flugzeugen. Das erfindungsgemässe Verfahren ermöglicht folglich ein äusserst leistungsfähiges Flottenmanagement einer ganzen Flotte von Flugzeugen.

Die vorne beschriebene Art der Extrapolation ist natürlich nur beispielhaft zu verstehen. Es können auch andere Arten der Extrapolation, z. B. nicht-lineare oder auf qualitativ bekannten Entwicklungen basierende verwendet werden. Die spezielle Wahl einer an die jeweilige Anwendung angepassten Extrapolation bereitet dem Fachmann keine Probleme.

Auch wenn bei dem konkret beschriebenen bevorzugten Ausführungsbeispiel für die Bestimmung des Kennfelds ein linguistisches Fuzzy Modell zur Verarbeitung von a-priori Know-how Verwendung findet, so ist die Erfindung nicht auf solche Modellierungen beschränkt.

Es ist auch nicht notwendigerweise so, dass das Kennfeld mittels a-priori-Know-how erstellt werden muss. Es sind auch andere Methoden möglich, um ein Kennfeld zu bestimmen, welches den Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter, der Zeitgrösse und dem Verschleiss angibt. So können beispielsweise je nach Anwendungsfall ab-initio-Rechnungen durchgeführt werden, oder Auslegungsrechnungen, Dimensionierungsrechnungen, physikalische Modellierungen, datengestützte Modellierungen, Systemverhaltensberechnungen. Ferner ist es möglich, das Kennfeld in Form von Polynomen, Look-up Tabellen, multilayer Perceptrons (neuronale Netzwerke), radial basis functions, Singleton und Takadi-Sugeno Fuzzy Modellen sowie Hinging Hyperplanes zu beschreiben.

Selbstverständlich ist es auch möglich, mehr als einen charakteristischen, für den Verschleiss sensitiven Parameter zu verwenden, wodurch das Kennfeld in einem höher dimensional Raum definiert ist.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Patentansprüche

1. Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegt, mit den folgenden Schritten:
 - a) für mindestens einen charakteristischen Parameter (T), der sensitiv für den Verschleiss (V) ist, wird ein Zusammenhang mit einer Zeitgrösse (A) ermittelt, welche repräsentativ für die Betriebsdauer ist;
 - b) für den charakteristischen Parameter (T) wird ein Grenzwert (G) festgelegt, der den maximal zulässigen Verschleiss angibt;
 - c) es wird ein Kennfeld (KF) erstellt, das einen Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter (T), der Zeitgrösse (A) und dem Verschleiss (V) angibt;
 - d) mit Hilfe messtechnisch erfasster Daten werden Ist-Werte für den charakteristischen Parameter (T) in Abhängigkeit von der Zeitgrösse (A) ermittelt;
 - e) aus den Ist-Werten wird jeweils anhand des Kennfelds (KF) der momentan vorhandene Verschleiss (V) ermittelt;
 - f) ausgehend von dem momentanen Ist-Wert des charakteristischen Parameters (T) wird mittels Extrapolation auf den Grenzwert (G) bestimmt, für welchen Endwert der Zeitgrösse (A) der maximal zulässige Verschleiss erreicht wird;
 - g) durch Vergleich dieses Endwerts mit dem Wert für die Zeitgrösse, der zu dem momentan vorhandenen Verschleiss gehört, wird die Restlebensdauer (RL) geschätzt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem das Kennfeld (KF) mit Hilfe von a-priori-Wissen über das Verschleissverhalten erstellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2 bei welchem das a-priori-Wissen den qualitativen und/oder quantitativen Verlauf von Verschleisskurven (K1,K2,K3,K4) umfasst, welche den Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter und der Zeitgrösse angeben.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Kennfeld (KF) mittels einem linguistischen Fuzzy Modell erstellt wird.
- 5 5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Kennfeld (KF) anhand von Messdaten oder basierend auf Plausibilitätsbetrachtungen modifiziert wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Kennfeld (KF) eine Fläche in einem dreidimensionalen Raum darstellt, welcher Raum durch den charakteristischen Parameter (T), die Zeitgrösse (A) und den Verschleiss (V) aufgespannt wird.
- 10 7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die messtechnisch erfassten Daten zur Ermittlung der Ist-Werte für den charakteristischen Parameter jeweils einer Filterung oder einer Mittelung unterzogen werden.
- 15 8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem mit Hilfe mehrerer Sätze von messtechnisch erfassten Daten ein Modell erstellt wird, mit dem ein Ist-Wert für den charakteristischen Parameter ermittelt wird.
9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die Vorrichtung ein Triebwerk, insbesondere ein Flugzeugtriebwerk ist.
- 20 10. Verwendung eines Verfahrens gemäss einem der Ansprüche 1 bis 9 für die Wartungsplanung, insbesondere eines Flugzeugs oder einer Vielzahl von Flugzeugen.

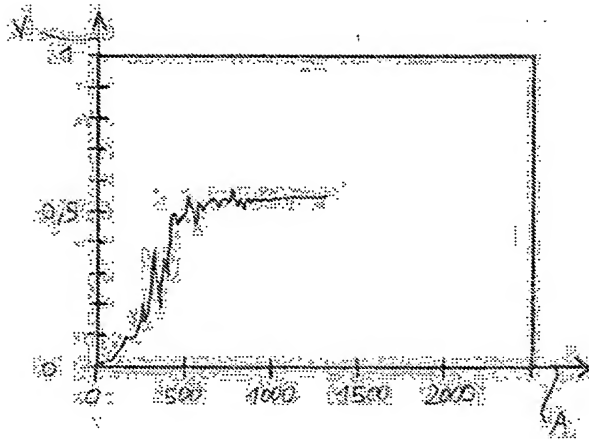
Zusammenfassung:

- Es wird ein Verfahren zur Schätzung der Restlebensdauer einer Vorrichtung vorgeschlagen, die während des Betriebs einem Verschleiss unterliegt, mit den folgenden Schritten:
- a) für mindestens einen charakteristischen Parameter (T), der sensitiv für den Verschleiss (V) ist, wird ein Zusammenhang mit einer Zeitgrösse (A) ermittelt, welche repräsentativ für die Betriebsdauer ist;
 - 10 b) für den charakteristischen Parameter (T) wird ein Grenzwert (G) festgelegt, der den maximal zulässigen Verschleiss angibt;
 - c) es wird ein Kennfeld (KF) erstellt, das einen Zusammenhang zwischen dem charakteristischen Parameter (T), der Zeitgrösse (A) und dem Verschleiss (V) angibt;
 - 15 d) mit Hilfe messtechnisch erfasster Daten werden Ist-Werte für den charakteristischen Parameter (T) in Abhängigkeit von der Zeitgrösse (A) ermittelt;
 - e) aus den Ist-Werten wird jeweils anhand des Kennfelds (KF) der momentan vorhandene Verschleiss (V) ermittelt;
 - 20 f) ausgehend von dem momentanen Ist-Wert des charakteristischen Parameters (T) wird mittels Extrapolation auf den Grenzwert(G) bestimmt, für welchen Endwert der Zeitgrösse (A) der maximal zulässige Verschleiss erreicht wird;
 - g) durch Vergleich dieses Endwerts mit dem Wert für die Zeitgrösse, der zu dem momentan vorhandenen Verschleiss gehört, wird die Restlebensdauer (RL) geschätzt
 - 25

(Fig. 3)

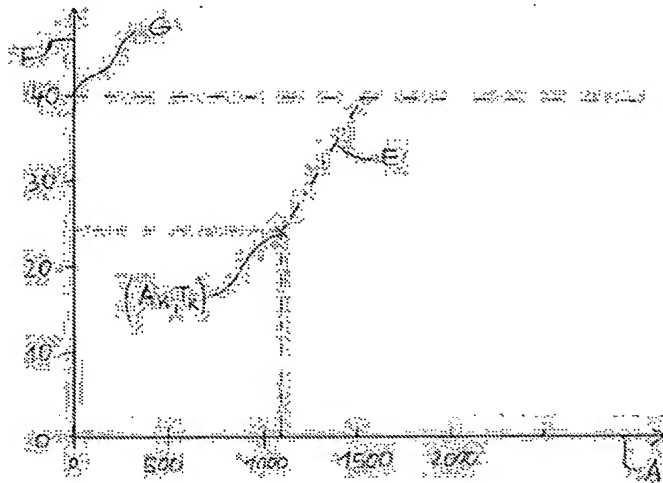
THIS PAGE BLANK (USPTO)

Fig. 1



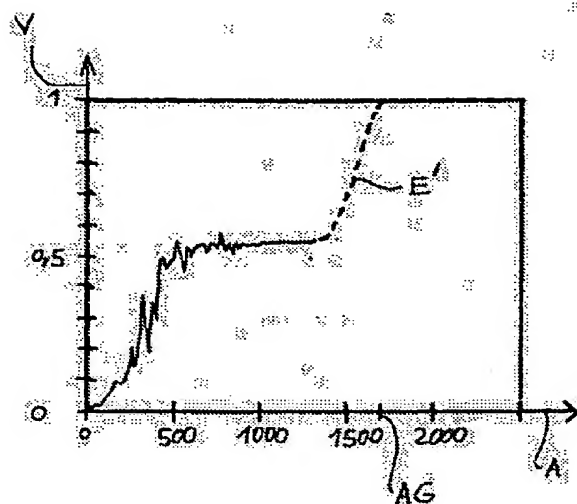
BEST AVAILABLE COPY

Fig. 5



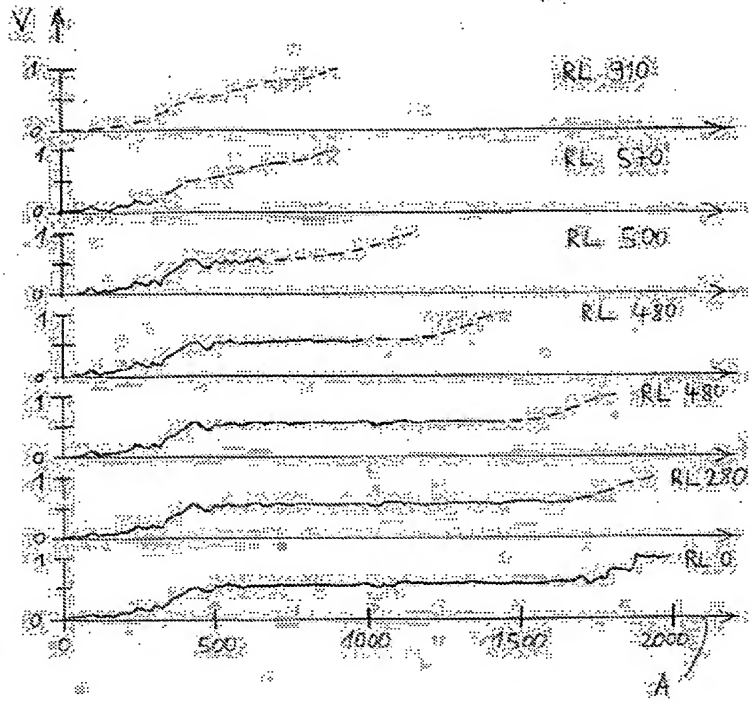
BEST AVAILABLE COPY

Fig. 6



BEST AVAILABLE COPY

Fig. 7



BEST AVAILABLE COPY

Fig. 1

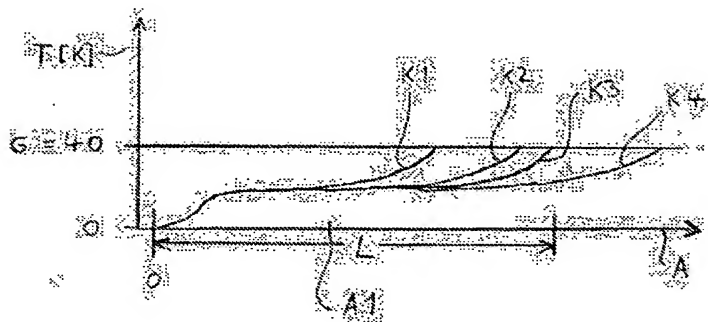
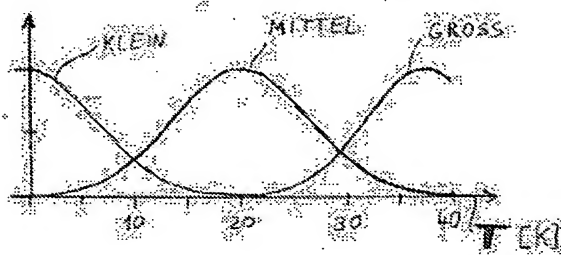


Fig. 2



BEST AVAILABLE COPY

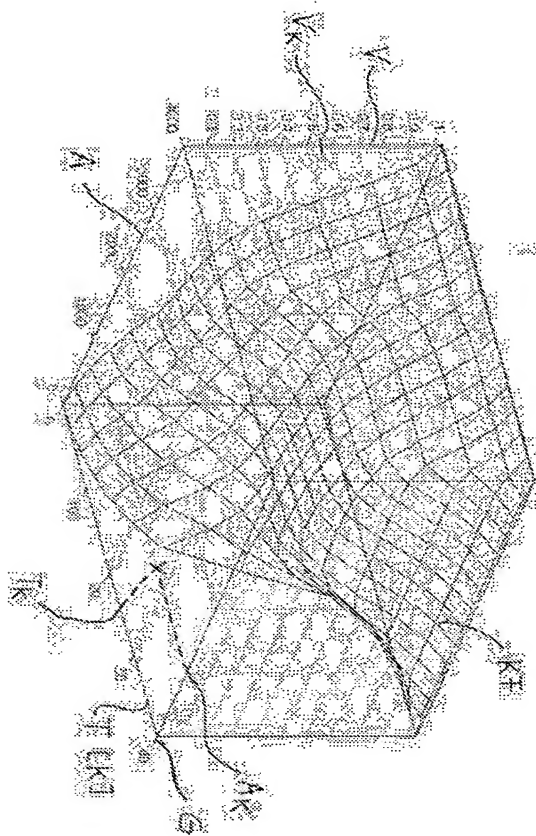


Fig. 3

BEST AVAILABLE COPY